



Harjalaitteen suunnittelu ja valmistus 3D-hiekkatulostimeen

Henrikki Sippola

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Ajoneuvotekniikka
Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikka
Älykkäät koneet

SIPPOLA, HENRIKKI:
Harjalaitteen suunnittelu ja valmistus 3D-hiekkatulostimeen

Opinnäytetyö 40 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Toukokuu 2020

Työssä suunniteltiin ja valmistettiin Hetitec Oy:lle 3D-hiekkatulostimeen harjajärjestelmä, joka puhdistaa tulosteen onnistumisen kannalta tärkeää laitteen osaa. Työ tehtiin, sillä nykyinen harjasysteemi ei puhdistaa tulostinta aina tarpeeksi tehokkaasti.

Ideointi ja suunnittelu perustuivat toteutettavuuteen ja komponenttien saatavuuteen. Ratkaiseva tekijä ideoinnin ja suunnittelun kannalta oli myös hiekkainen ympäristö, jonka takia liikkuvien osien määrä oli syytä minimoida. Suunnittelu tehtiin käyttäen Autodesk Inventorya, jolla mallinnettiin kaikki komponentit ja sovittiin ne kokonaisuudeksi varmistaen, että laitteen kokoonpano tulisi onnistumaan. Prototyypin valmistuksessa käytettiin alkuperäiseen suunnitelmaan nähden joitakin oikoteitä, jotta osien koneistuksen tarve prototyypille minimoituisi. Kaikki laitteen osat, joita ei saatu suoraan ostettua, tulostettiin muovista. Laitteen ohjaamiseen käytettiin Arduino-mikrokontrolleria.

Valmis prototyyppi toimi halutulla tavalla, sekä mekaanisesti että ohjauksen puolesta. Jotta laite olisi tarpeeksi toimintavarma pitkäaikaiseen käyttöön, muovista tulostetut osat tulisi korvata vahvemmillä materiaaleilla sekä liimaliitokset paremmilla kiinnitysmenetelmillä.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Vehicle technology
Intelligent machines

SIPPOLA, HENRIKKI:
Design and manufacturing of a brush device for 3D printer

Bachelor's thesis 40 pages, appendices 2 pages
May 2020

The subject of this thesis was to design and manufacture a prototype of a brush system for Hetitec Oy's sand 3D printer. The Purpose of the brush system is to clean the specific part of the device that is important for the success of the printout. The job was done because the current brush system does not always clean the printer efficient enough.

Ideation and design were based on feasibility and component availability. A crucial factor for ideation and design was also the sandy environment, which is why the number of moving parts should be minimized. All parts were designed and assembled in 3D using Autodesk Inventor, ensuring that the assembly of the device would be successful. Some shortcuts to the original design were used to build the prototype faster and to minimize the need of machining parts. All parts of the device that could not be purchased directly were printed in plastic. An Arduino microcontroller was used to control the device.

The outcome of the work was, that finished prototype works as desired, both mechanically and software wise. In order for the device to be sufficiently reliable in long-term use, plastic printed parts should be replaced with stronger materials and adhesive joints with better attaching methods.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
1.1	Yritys	5
1.2	Työn tavoitteet.....	5
2	TEORIA	6
2.1	Kaksitukisen akselin maksimitaipuma tasaisella kuormalla.....	6
2.2	Urakuulalaakerin mitoitus	6
2.3	Johdinten mitoitus	8
2.4	Binder-jetting tulostus.....	9
3	TULOSTIN	11
4	SUUNNITTELU.....	14
4.1	Ideointi	14
4.2	Harja	15
4.3	Akseli ja laakerit	17
4.4	Moottori ja voimansiirto	18
4.5	Ohjauksen komponentit ja sähköistys	21
4.6	Laipat	23
5	PROTOTYYPIN VALMISTUS JA TESTAAMINEN	25
5.1	Testipenkin valmistus.....	25
5.2	3D-tulostettavien osien valmistus.....	25
5.3	Akselin kokoaminen	28
5.4	Kytkenät ja kokoonpano.....	28
5.5	Ohjelmointi	30
5.6	Testaaminen	32
6	POHDINTA	35
6.1	Riskit	35
6.2	Yhteenveto ja kehitysideat	36
	LÄHTEET.....	38
	LIITTEET	39
	Liite 1. ZZ-Brush harjat.	39
	Liite 2. 775 DC motor dimensions	40

1 JOHDANTO

1.1 Yritys

Hetitec Oy on suomalainen Valkeakoskella toimiva yritys, joka valmistaa valuosia, muotteja ja keernoja käyttäen uudehkoa 3D-hiekkamuottitulostusmenetelmää. Hetitecin tuotantoprosessi takaa tuotteille nopeamman toimituksen ja mahdollisuuden toteuttaa monimutkaisempia geometrioita kuin perinteisillä menetelmillä. Hetitec Oy tarjoaa myös palveluna valusimulointia sekä valukonsultointia.

1.2 Työn tavoitteet

Työn tarkoituksena on suunnitella ja valmistaa prototyyppi 3D-hiekkamuottitulostimeen kiinnitettävästä harjausjärjestelmästä. Järjestelmän tarkoitus on puhdistaa, olemassa olevaa harjaa tehokkaammin, tulostuksen kannalta kriittistä laitteen osaa.

Tämä opinnäytetyö tehdään tarpeesta, sillä nykyinen harja ei kykene aina puhdistamaan laitetta tarvittavalle tasolle, mikä saattaa pahimmillaan johtaa tulostettavan muotin käyttökelvottomuuteen.

2 TEORIA

Tässä osiossa käydään läpi opinnäytetyössä käytettäviä osien mitoittamisen kannalta tärkeitä kaavoja, sekä 3d-hiekkatulostimen toimintaperiaate.

2.1 Kaksitukisen akselin maksimitaipuma tasaisella kuormalla

Kaksitukisen palkin maksimitaipuman kaava on

$$v_{max} = \frac{5 \cdot F \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I} \quad (1)$$

Jossa F on tasaisen kuorman aiheuttama voima ja L on palkin pituus. E on materiaalille ominainen kimmokerroin, joka kuvastaa kykyä vastustaa materiaalin uudelleenmuovautumista. Jäyhyysmomentti I on palkin profiilista riippuva suure, joka kuvaa profiilin kykyä vastustaa taipumista.

Umpinaiselle pyöreäprofiiliselle akselille katsotaan taulukkokirjasta kaavaksi

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (2)$$

Jossa d on akselin halkaisija. (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2015, 145,148.)

2.2 Urakuulalaakerin mitoitus

Urakuulalaakeria valittaessa on syytä tarkastaa ainakin vähimmäiskuormavaatimus, laakerin staattisen kuormituksen kantokyky sekä staattinen varmuus. Vähimmäiskuormavaatimus on laakerille laskettavissa oleva minimikuorma, jolla laakeri toimii niin kuin pitäisi. Jos vähimmäiskuormavaatimusta ei täytetä, niin esimerkiksi urakuulalaakerin tapauksessa, kuulat eivät välttämättä pyöri laakerin sisällä vaan laahaavat kuorman puutteen vuoksi.

$$F_{rm} = k_r \left(\frac{\vartheta \cdot n}{1000} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{d_m}{100} \right)^2 \quad (3)$$

Kaavassa k_r on laakerin laskennallinen kerroin, joka saadaan valmistajan katalogeista. ϑ on laakerin voiteluaineen viskositeetti ja n on kierrosnopeus. d_m on laakerin keskihalkaisija, joka saadaan kaavalla

$$d_m = \frac{D + d}{2} \quad (4)$$

jossa D on laakerin ulkohalkaisija ja d laakerin sisähalkaisija. (Luosma. Urakuulalaakerien laskenta.)

Staatitisen kuormituksen kantokyky lasketaan urakuulalaakerille kaavalla

$$P_0 = 0,6 \cdot F_r + 0,5 \cdot F_a \quad (5)$$

Kaavassa F_r on laakeriin kohdistuva säteiskuorma ja F_a on laakeriin kohdistuva aksiaalikuorma.

Jos staatitisen kuormituksen kantokyky on alle säteiskuorman, staatitinen kantokyky on sama kuin säteiskuorma. Staatitella kuormituksen kantokyvyllä lasketaan laakerille staatitinen varmuus

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (6)$$

C_0 on valmistajan katalogeista löytyvä staatitisen kantavuuden arvo.

Erilaisille laakereille ja käyttötapauksille löytyy ohjearvoja mitä staatitisen varmuuden tulisi olla. Esimerkiksi urakuulalaakerille tilanteessa, jossa ei ole värähtelyä eikä iskuja sekä kyseessä on normaalit kuulat, staatitisen varmuuden minimiohjearvo on kuvassa 1 näkyvän taulukon mukaan arvo 1. (SKF. Size selection based on static load.)

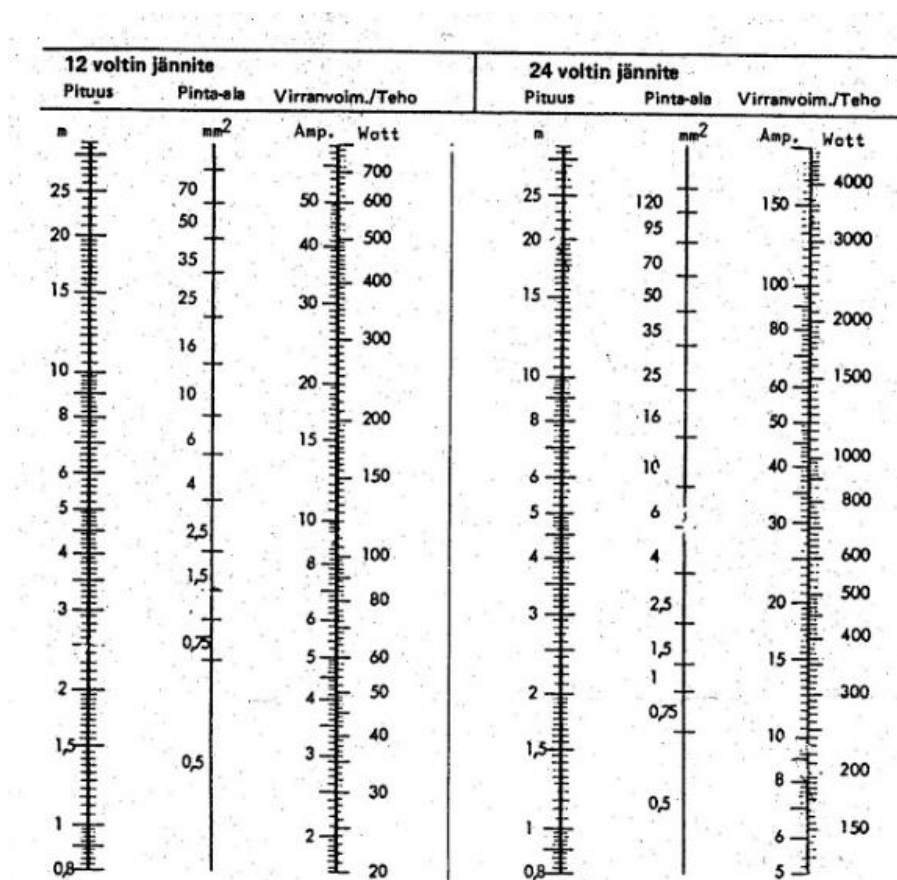
table 1 - Guideline values for the static safety factor s_0

Type of operation	Rotating bearing						Non-rotating bearing	
	Performance requirements (e.g. quiet running or vibration-free operation)							
	unimportant		normal		high			
	Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings
Smooth, vibration-free	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Pronounced shock loads ¹⁾	$\geq 1,5$	$\geq 2,5$	$\geq 1,5$	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

KUVA 1. Staattisen varmuuden ohjearvoja (SKF. Guideline values for static safety factor.)

2.3 Johdinten mitoitus

Johdinten poikkipinta-alan mitoittamisessa voidaan käyttää joko laskennallista menetelmää tai nomogrammia. Kuvassa 2 on 12V ja 24V järjestelmien nomogrammit.



Kuva 2. Johdinten mitoitus nomogrammi. (Koivisto, Mikkolainen & Rantala 2012, 148)

Kuvassa vasemmalla on johtimen pituus ja oikealla johtimessa kulkeva virran tai tehon arvo. Johtimen pituuden ja virran arvon väliin vedetään viiva ja katsotaan mistä kohtaa viiva leikkaa keskellä näkyviä poikkipinta-alan arvoja. Johtimeksi valitaan leikkauskohdan osoittamasta arvosta seuraava suurempi poikkipinta-ala.

Johdinten poikkipinta-ala mitoitetaan laskennallisesti kaavalla

$$A = l \cdot \rho \cdot \frac{I}{U_{vl}} \quad (7)$$

joka saadaan yhdistämällä resistanssin ja ohmin lain kaavat. kaavassa A on johtimen poikkipinta-ala, l johtimen pituus, ρ johdinmateriaalin ominaisvastus ja U_{vl} on sallittu jännitehäviö. Johtimen poikkipinta-alaksi valitaan laskennallisesta arvosta nähden seuraava suurempi johtimen koko. (Mäkelä ym. 2015, 120.)

2.4 Binder-jetting tulostus

Binder-jetting tulostuksen periaate on, että 3d-tuloste rakennetaan sitomalla hienojakoista materiaalia kuten esimerkiksi hiekkaa haluttuun muotoon. Itse Binder-jetting tulostus prosessi voidaan jakaa vaiheisiin. Kuvassa 2 on esitetty havainnollistettu kuva Binder-jetting tulostimesta. Tulostuksen vaiheet ovat numeroituna kuvaan.

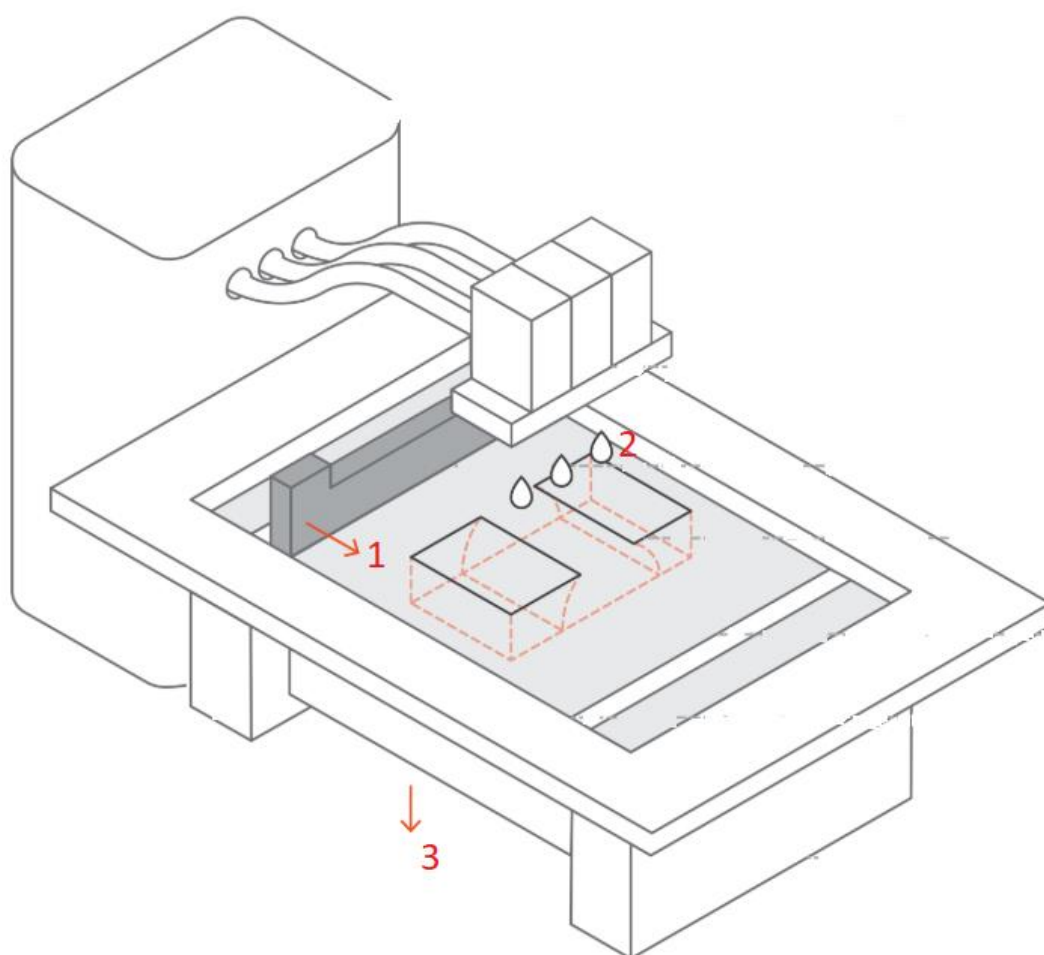
Ensimmäisessä vaiheessa tulostimen hiekan tasoittaja ripottelee tasaiselle tulostusalustalle ohuen kerroksen hiekkaa sekä lanaa hiekan tasaiseksi kerrokseksi.

Toisessa vaiheessa tulostuspää levittää sidosainetta, eli liimaa ne kohdat hiekasta, minkä halutaan olevan lopullisessa tulosteessa kiinteää materiaalia.

Kolmannessa vaiheessa tulostimen tulostusalusta liikkuu alemmaksi ja edellisen hiekkakerroksen päälle tehdään uusi kerros ensimmäisen vaiheen mukaisesti.

Prosessi toistuu, kunnes tuloste on valmis. (3D HUBS. Introduction to Binder Jetting 3D printing.)

Kun tulostin on valmis, tulosteen annetaan levätä ja kovettua jonkin aikaa, minkä jälkeen se otetaan pois tulostimesta ja siitä putsataan irrallinen hiekka pois esimerkiksi paineilmaa käyttäen.



KUVA 2. Binder-jetting tulostuksen vaiheet.

Binder-jettingin etuja verrattuna perinteisempään 3D-tulostukseen on, että muotin jähmettyminen tapahtuu huoneenlämmössä, mikä tekee lopputuloksesta lähes vääristymättömän. Perinteisemmällä tulostimella esimerkiksi muovია tulostettaessa muovin jähmettyminen aiheuttaa vääristymää valmiin tulosteen ja alkuperäisen mallin välillä. Etuna Binder-jettingissä on myös se, että tulosteeseen ei tarvitse tehdä tukirakenteita, sillä kiinteitä tulosteen osia ympäröi irrallinen materiaali, joka antaa tarvittavan tuen kiinteille kohdille.

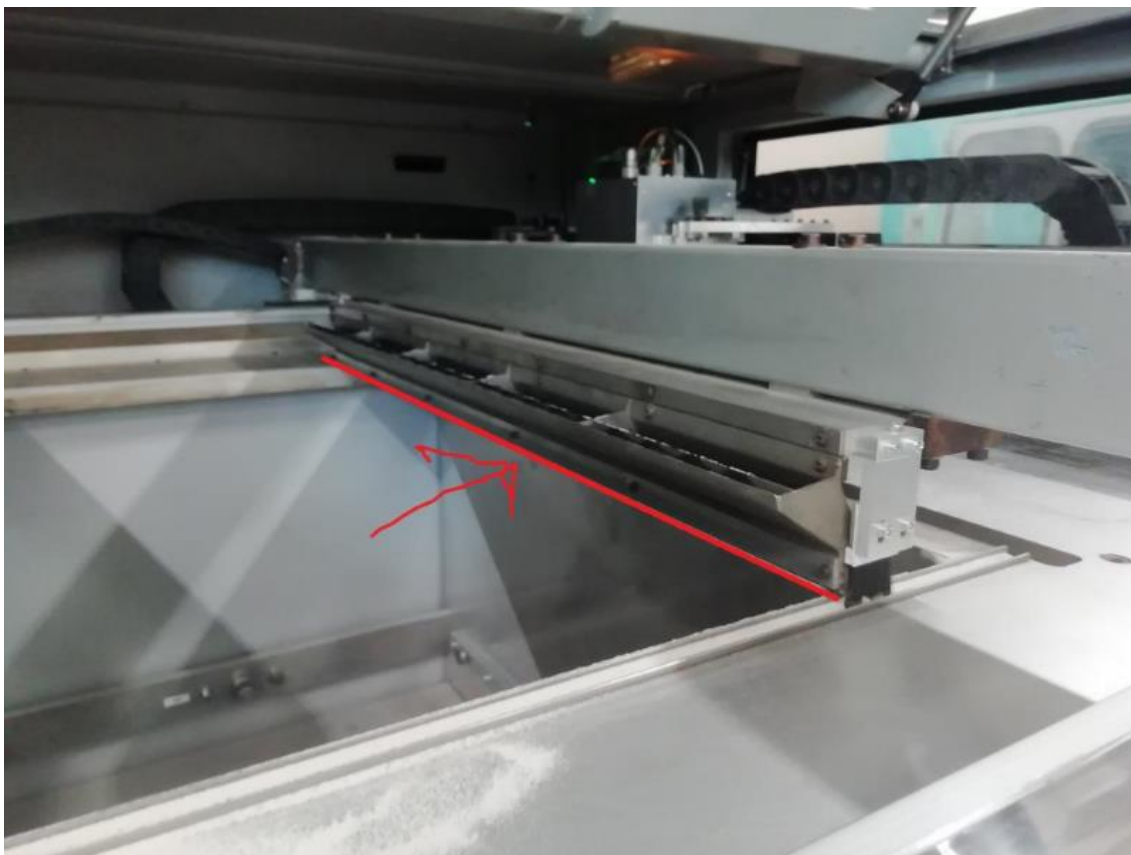
3 TULOSTIN

Hetitec Oy:n tiloista löytyvä 3d-hiekkatulostin on saksalaisen, teollisuuden käyttöön tulostimia valmistavan, Voxeljetin VX1000 tulostin (KUVA 3). VX1000 tulostin on suunniteltu erityisesti hintatehokkaaseen keskikokoisten muottien valmistukseen. Tulostin soveltuu myös hyvin piensarjoihin. Tulostusalueen koko kyseisessä tulostimessa on jopa 1000mm x 600mm x 500mm ja tarkkuus 600dpm. Hiekka-muottien lisäksi tulostimella on mahdollista valmistaa myös keraamisia ja muovisia tulosteita. VX1000 tulostimessa käytettävä binder-jetting teknologia mahdollistaa haastavien ja monimutkaisten geometrioiden tulostuksen. (Voxeljet. VX1000 3D printing system.)



KUVA 3. Voxeljetin VX1000 3d-hiekkatulostin.

Hetitec Oy:n VX1000 tulostimessa ongelmana on, että kun levitetään kerros hiekkaa ja lanataan se tasaiseksi, saattaa hiekan tasoitus lanaan jäädä hiekkaa. Kuvassa 3 on VX1000 laitteen hiekan tasoittaja sekä punaisella viivalla merkattu hiekan tasoittaja lana.



KUVA 4. Hiekan tasoitus lana.

Laitteessa on olemassa staattiset harjat (KUVA 5), joidenka pitäisi puhdistaa lana jokaisen kerroksen tekemisen välissä, kun hiekan siroittelija käy täyttöasemassa tulostuspään liimatessa materiaalia. Staattiset harjakset eivät kuitenkaan kykene aina puhdistamaan kaikkea hiekkaa pois lanasta, mikä saattaa johtaa siihen, että seuraava kerros hiekkaa ei ole tasainen. Kun hiekka levittyy epätasaisesti uudeksi kerrokseksi, tulosteesta tulee aaltoileva, jonka korjaaminen vie aikaa tai tuloste saattaa olla jopa käyttökelvoton.



KUVA 5. VX1000 laitteessa oleva hiekan tasoittajan pudistusharja.

4 SUUNNITTELU

4.1 Ideointi

Suunnittelu aloitettiin ideoimalla Hetitecin henkilöstön kanssa, millainen puhdistus systeemi olisi hyvä ja mahdollisesti laitteessa kiinni olevaa staattista harjamattoa tehokkaampi vaihtoehto. Jotta hiekka ei pölyä kaikkialle eikä hiekan tasoittimeen jää kosteutta, nesteet ja paineilma pystyttiin sulkemaan heti pois. Alustavasti päädyttiin siihen, että jonkin näköinen pyörivä harja saattaisi puhdistaa tasoittimen tehokkaammin kuin staattinen harjamatto, jotenka tätä ideaa lähdettiin pohtimaan tarkemmin.

Alustavasti pyörivälle harjalle oli kaksi ideaa, joista ensimmäinen oli harja, joka tasoittimen ollessa paikallaan liikkuu sen päästä päähän harjaten sen pyörivällä harjalla. Jälkimmäinen idea oli koko tasoittimen mittainen pyörivä harja. Näistä kahdesta vaihtoehdosta päädyttiin jälkimmäiseen, sillä se vaikutti yksinkertaisemmalta toteuttaa ja minimoimalla liikkuvien osien määrää laitteen toimintavarmuus oletusarvoisesti kasvaisi. Tähän tulokseen päädyttiin sillä olettamuksella, että liikkuvat osat ja hiekkapöly ovat huono yhdistelmä.

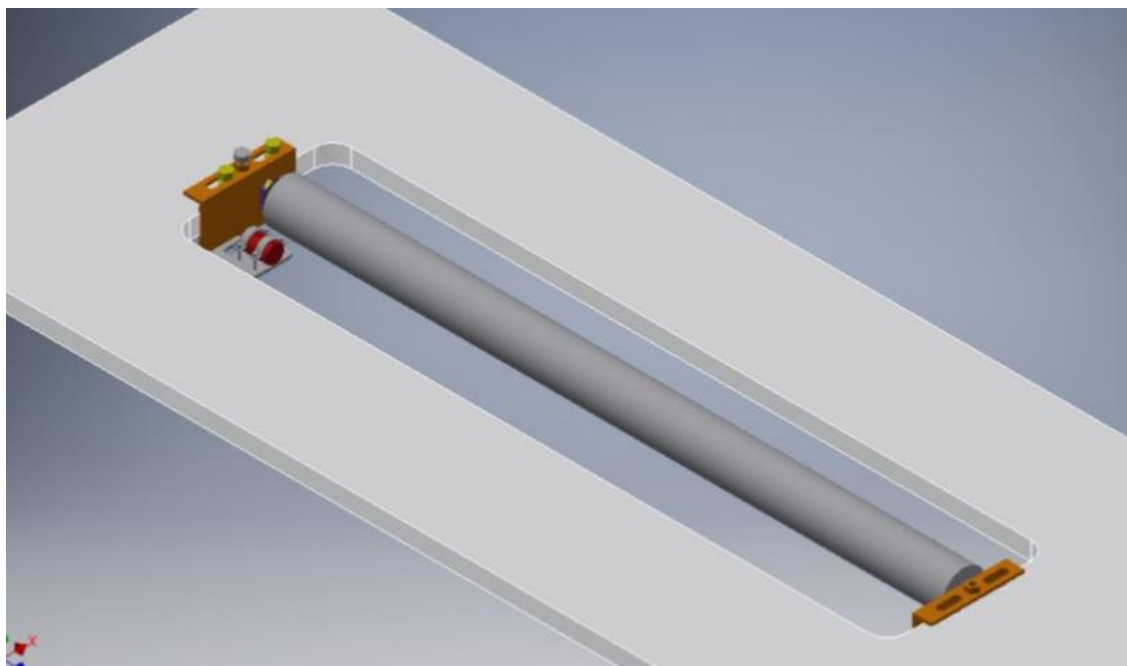
Alun perin Hetitecin puolesta esitettiin toive, että harja olisi yhteydessä tulostimen ohjelmistoon, mutta laitteen ohjelmistojen muokkaaminen osoittautui mahdottomaksi ilman laitevalmistajaa. Päätettiin, että tulostimen ehjänä pysymisen kannalta on parempi, että harja on oma erillinen laite, joka kiinnittyy tulostimeen.

Toiveena esitettiin myös, että toisin kuin nykyisellä harjamatolla, uuden harjan korkeus ja asema säätö pystyttäisiin toteuttamaan laitteen päältä käsin. Luonnollisesti laitteen tulisi myös olla helposti asennettavissa.

Helppokäyttöisyyden ja halvan hinnan vuoksi harjan moottoriksi valitaan tasavirtamoottori. Voimansiirrossa päädyttiin hihnan, rattaiden ja ketjun välillä hihnaan, sillä hihnoiden osalta näytti olevan paras valikoima sovellutukseen sopivia osia.

Harjan ohjaamiseen valikoitui ohjelmoitava Arduino-mikrokontrolleri, helppo-käyttöisyyden, hinnan ja valmiiksi yhteensopivien komponenttien saatavuuden vuoksi.

Kuvassa 6 on hahmotelma harjasta, joka suunnitelmassa sijoitettaisiin Kuvan 5 staattisen harjamaton tilalle. Yksinkertaisuudessaan siis tulostimeen kiinnittyvien kuvassa oranssilla näkyvien päätylaippojen väliin tulisi harja, joka pyörii laippoihin kiinnitetyillä laakereilla. Toiseen päätylaippaan tehdään ”lattia”, johon saadaan moottori ja muu elektroniikka kiinni.



KUVA 6. Alustava hahmotelma suunniteltavasta laitteesta.

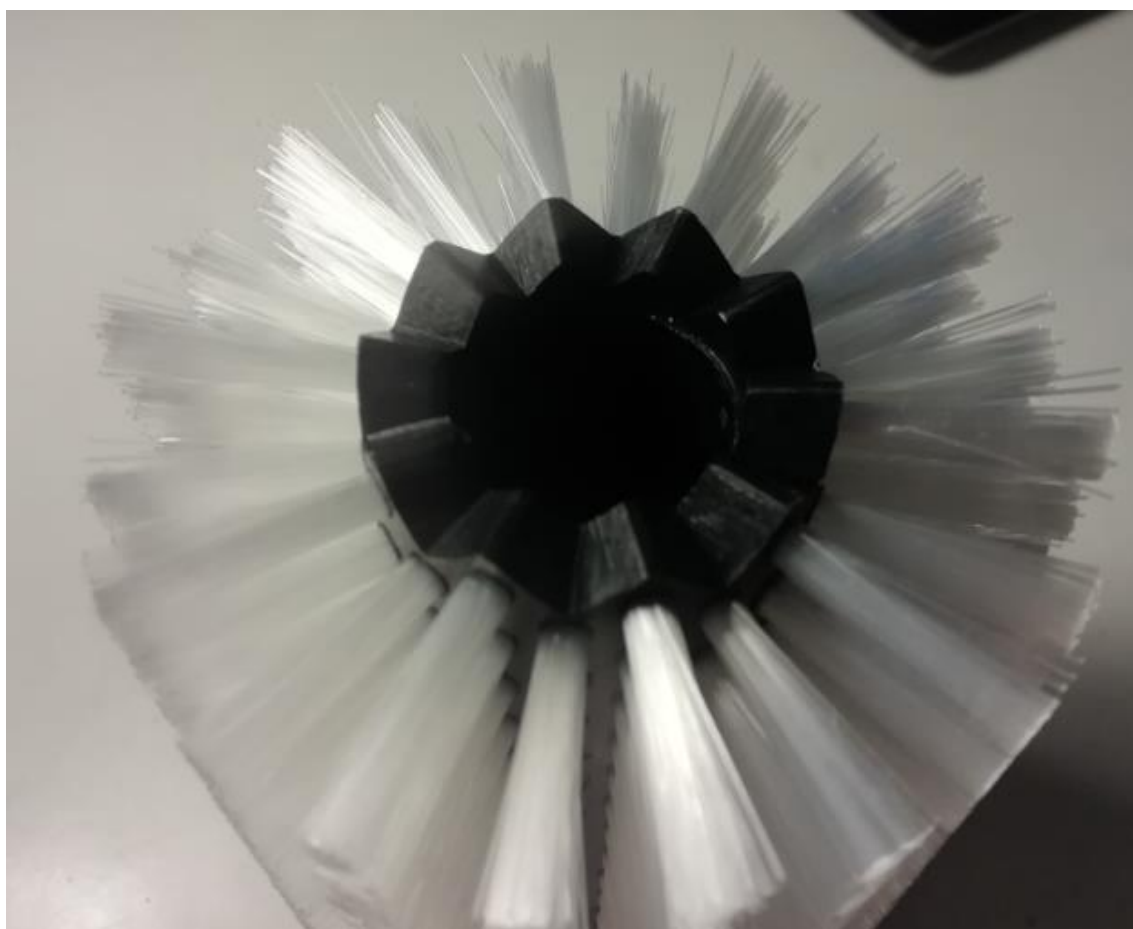
Aukossa, johon harja kiinnittyy, eli täyttökuilussa on ritilä 8 cm syvyydessä täyttökuilun yläreunasta mitattuna. Tämä korkeussuunnassa rajattu tila, rajoittaa harjan kokoa, sekä harjan päässä olevien laippojen korkeutta.

4.2 Harja

Harjan tyyppi on mallinnusta pohjaten pyörivä harja, joka kiinnitetään akselille. Harjattavan alueen pituus on 110cm. Jotta harja mahtuu pyörimään hiekantasoit-

timen ja täyttökuilun pohjaritilän välillä, sen maksimihalkaisijan on oltava pienempi kuin 8cm. Pääteltiin, että maksimoimalla harjan halkaisija, kuitenkin käytössä olevan tilan puitteissa, harjan ja tasoittimen pinnan muodot vastaavat toisiinsa paremmin. Tämä johtaa siihen, että harjan ja tasoittimen kosketus ala on suurempi. Suurempi kosketusala puolestaan vähentää harjan ja tasoittimen kosketuspaineen tarvetta, mikä oletusarvoisesti kuluttaa vähemmän ja tasaisemmin harjaa ja tasoittajaa samalla puhdistusteholla, kuin pienempi harja suuremmalla paineella.

Hetitec Oy:n suosituksesta harja valittiin saksalaisen harjavalmistaja Mink:in valikoimasta. Katalogista valikoitui ZZ-brush tyyppinen akselille kiinnitettävä pyörivä harja. ZZ-brush harjat ovat lyhyitä harjaksia, joissa on sahalaidat päädyissä (KUVA 7), mikä mahdollistaa sen, että vain päädyssä olevat harjat kiinnitetään akseliin ja väliin jäävät harjat pyörivät päädyssä olevien mukana.



KUVA 7. ZZ-brush harjan rungon sahalaitakuviointi.

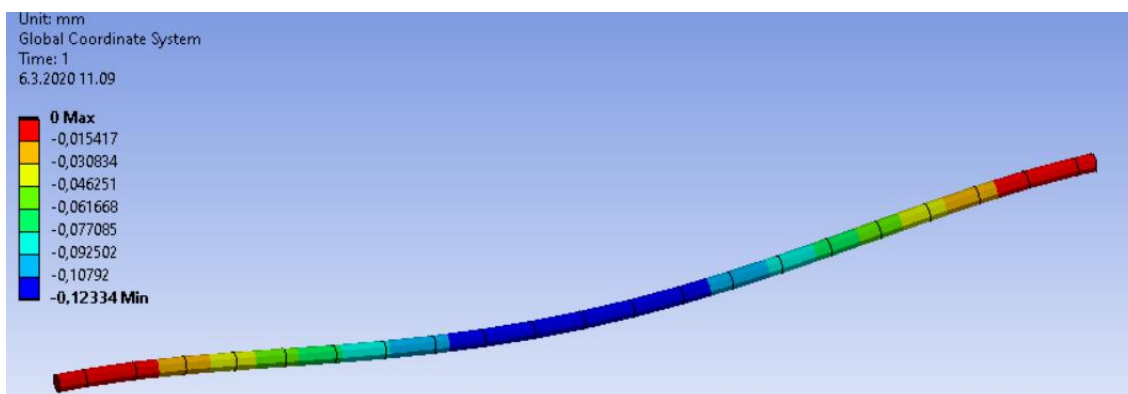
Harjaksi otettiin yksitoista kappaletta kymmenen senttimetrin harjaksia, joidenka ulkohalkaisija on seitsemän senttimetriä ja akselireiän halkaisija on kaksikymmentä millimetriä. Harjasten materiaaliksi valittiin sama kuin käytössä olevissa harjaksissa, eli polypropyleenia. Harjan rungon materiaali on tehty polyamidista ja lasikuidusta. (Liite 1)

Harjoissa ei itsessään ole mekanisme, jolla ne kiinnittyvät akselille eikä tilan puutteen vuoksi tilattu normaalisti harjan päätyihin tulevia kiinnityspaloja. Harjojen kiinnittyminen akselille toteutettiin poraamalla akselin päissä olevien harjasten runkoon reiät, johon tehtiin kierteet ja kiristettiin harja ruuveilla akselille.

4.3 Akseli ja laakerit

Harjasten akselille olennaista on, että se ei mene notkolle ja aiheuta hiekan ta-soittimeen epätasaista kulumista. Koska harjan oma runko ei ole kantava, valitaan niin suuri halkaisija akselille kuin mahdollista, eli suurimman harjaan saatavilla olevan akselireiän mukaan 20 mm. Pituutta akselilla on 115cm.

Hinnan ja saatavuuden takia akselin materiaaliksi valitaan S355 teräs. Kaavalla 1 ja 2 laskettaessa akselin maksimitaipuma on 0,36mm ja Ansys ohjelmalla tehdyn FEM-simuloinnin mukaan S355 teräksellä ja arvioidulla harjojen 2kg yhteispainolla akselin taipuma kuorman alla on vain 0,12mm, joka on riittävän vähäistä (KUVA 8). Ansyskella lasketussa taipumassa akselin tuenta päädyissä on ulokekannattimet, minkä johdosta taipuma on pienempi kuin laskukaavalla. Tarvittavaa pyöröterästä löytyy rautakauppojen hyllyltä 2 m mittaisina tankoina.



KUVA 8. Akselin taipuma.

Laakereiksi otettiin 20x42x12 laakerit, koska ne sopivat suoraa akselille ilman työstöä, ovat helposti saatavilla ja halvat. Merkintä 20x42x12 tarkoittaa, että laakerin sisähalkaisija on 20 mm, ulkohalkaisija 42 mm ja leveys 12 mm.

Laakerien kokoluokan mukaisesti SKF käyttää tämän kokoluokan laakereissa MT47 voiteluainetta, jonka viskositeetti on 40 asteessa 70mm²/s. (SKF. Greases for capped bearing.) Laskennassa tarvittava kerroin μ saadaan laakerin spesifikaatioista. Tälle laakerille μ on 0.03. /9/ Näin pienestä μ kertoimesta voidaan päätellä, että laakerin minimikuormavaatimus kaavan tulos on kilonewtoneina. Teräsakselin, harjojen ja hiekantasoittimen tuottama voima laakeria kohden arvioidaan olevan noin 30 N säteiskuormaa.

Kaavalla 3 lasketaan laakerille minimikuormavaatimus, joka on 0,078 kN. Valitessa pienempi viskositeettisen voiteluaineen, esimerkiksi SKF:n käyttämä LHT23(27mm²/s) ja harjan pyörimisnopeudella 1000 kierrosta minuutissa, minimikuormavaatimus tippuu 0,026kN, joka on alle harjan ja hiekantasoittimen aiheuttaman kuorman.

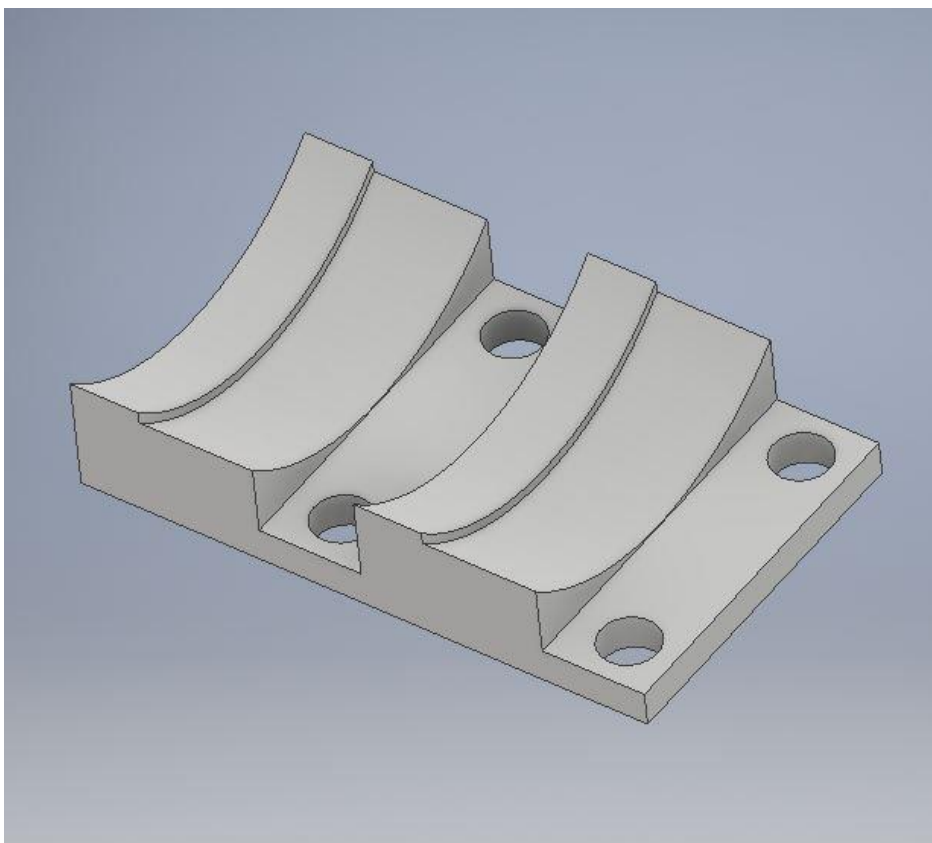
Koska kaavalla 5 staattinen kantokyky jää alle säteiskuorman johtuen siitä, että aksiaalista kuormitusta ei ole, staattinen kantokyky on sama kuin säteiskuorma, eli 30N. Laakerin Spesifikaatioista katsottuna staattinen kuormankestokyky on 5kN (SKF. W 6004-2RS1 Deep groove ball bearing.), mikä kaavan 6 perusteella antaa staattiseksi varmuudeksi yli käyttötapaukseen tarvittavan arvon.

4.4 Moottori ja voimansiirto

Tässä vaiheessa ei pystytty kuin suuntaa antavasti arvioimaan moottorilta tarvittavaa vääntöä, joten moottoriksi valittiin yleisesti käytetty, luotettava ja halpa 775 tasavirtamoottori. Moottorin väännön uskottiin olevan riittävä, sillä sitä on käytetty jopa omatekoisten porakoneiden moottorina. Moottorin halkaisija on 42mm ja pi-

tuus 98mm, eli moottori on myös sopivan kokoinen (Liite 2). Moottorin käyttöjännitealue (12-36V) antaa myös vapauksia virtalähteen ja voimansiirron välitysten valintaan.

Moottorin jalustaksi suunniteltiin moottorin muotoja mukaileva osa, joka kiinnittyy päätylaippaan ruuveilla (Kuva 9). Jalustaan tulee kiinni putkiklemmarit, joilla moottori kiristyy paikalleen. Moottorin kiinnitys on toteutettu näin, jotta moottorin etuosaan voidaan kiinnittää epäkeskiöhihnankiristin.



KUVA 9. Moottorin jalusta ilman putkiklemmareita.

Hyvän saatavuuden, hinnan ja vähäisen tilan viemisen vuoksi voimansiirtoon otettiin yleisesti käytettyä GT2 -hammashihna ja sitä vastaavat alumiiniset veto-
pyörät välityssuhteella 5:1 (Kuva 10)

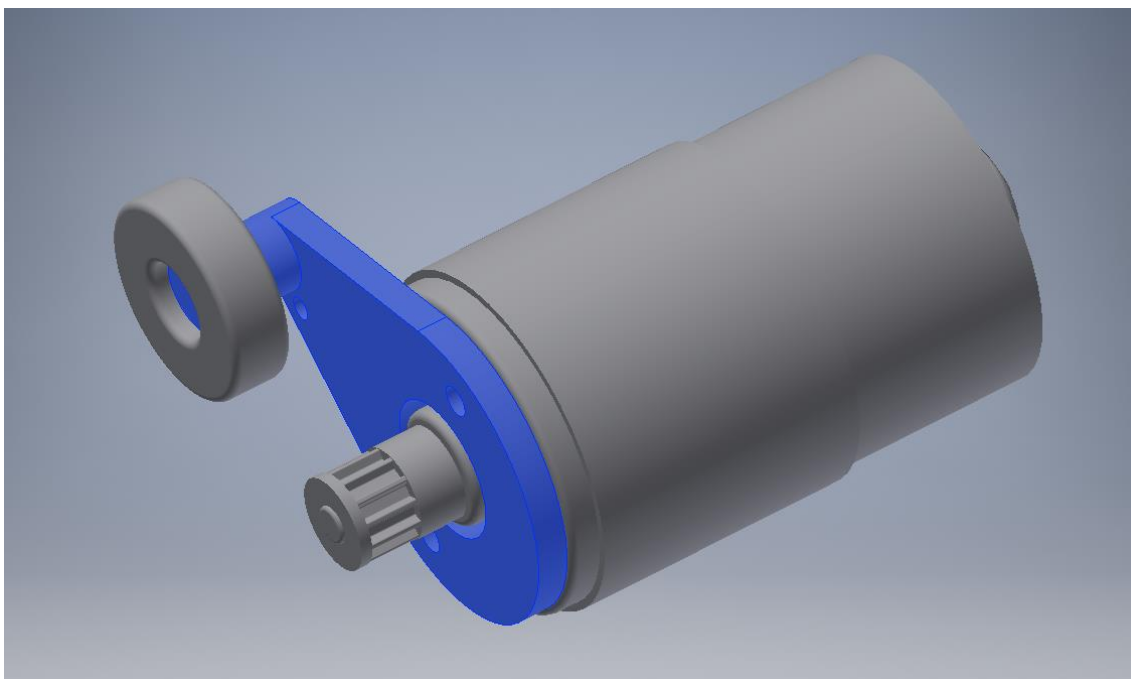


KUVA 10. Hihnavetopyörät.

Esimerkiksi moottorin jännitteellä 12V, tällä välityssuhteella harja ei ylitä sen suositeltua maksimipyörimisnopeutta 3000rpm, vaikka harjalla ei olisi pyörimisvastusta ollenkaan. Tilatulla hihnalla ja vetopyörillä moottorin akselin ja harjan akselin etäisyys tulee olemaan 75mm.

Moottoriin kiinnitettävä vetopyörä sopii suoraan moottorin akselille. Harjan akselille tulevasta vetopyörästä koneistettiin ylimääräistä materiaalia pois sekä akselireikä oli suurennettava akselille sopivaksi. Harjan akseliin kiinnittyvä vetopyörä tulee kiinni akseliin kiilalla.

Hihnan kiristimen osalta päädyttiin yksinkertaiseen ja helposti toteutettavaan ratkaisuun, jossa hihnankiristin kiinnittyy moottorin etuosaan moottorissa oleviin kiinnitysruuvin reikiin ja hihna kiristetään kiertämällä moottoria jalustallaan. Hihnaa vasten kiristimessä on 10x26x8 laakeri. Suunnitelmassa kiristimeen asetaan vielä lisäksi jousi, ettei se löysty. Hihnankiristin tukkii myös moottorin edessä olevat aukot ja estää sitä kautta hiekan pääsyn moottoriin. Kuvassa 11 on hihnankiristin kiinni moottorissa. Jousi tulee kiinni kuvassa laakerin alla tapin vieressä näkyvään reikään.



KUVA 11. Moottori ja hihnankiristin.

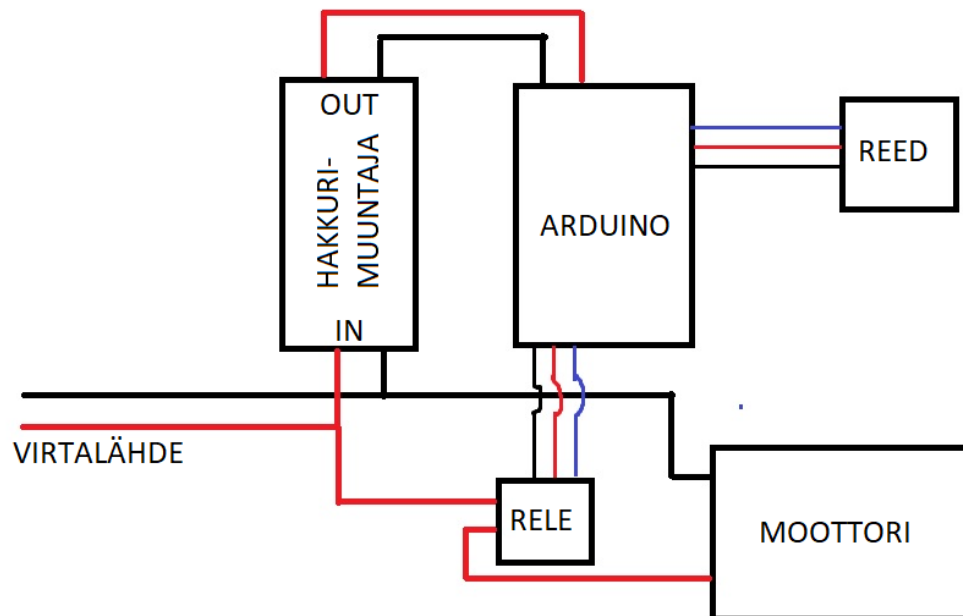
4.5 Ohjauksen komponentit ja sähköistys

Pienen koon, hinnan ja helppokäyttöisyyden vuoksi ohjainlaitteeksi valitaan Arduino Nano. Hiekan tasoittimen aseman tunnistamiseksi käytetään Reed-anturia ja moottorin virran syöttö ohjataan releellä.

Reed-anturi on elektroninen kytkin, joka kytkeytyy magneettikentän vaikutuksesta. Anturi rakentuu yleensä kahdesta tai useammasta toistensa päällä limittäin olevasta litteästä ja taipuisasta ferromagneettisesta terästä, jotka ovat suljettuna inerttiä kaasua sisältävään lasiputkeen. Lasiputkessa olevien terien välissä on pieni ilmarako. Kun Reed-anturin terät viedään magneettikenttään, limittäin päällekkäin olevien terien päät muuttuvat magneettisesti vastakkaisnapaisiksi ja vetävät toisiaan puoleensa. Jos magneettinen voima on tarpeeksi suuri taivuttamaan teriä riittävästi, terät osuvat toisiinsa ja virta pääsee kulkemaan anturin läpi. (RRE. How does a Reed Switch work?.)

Jotta Reed-anturi kykenee tunnistamaan tasoittimen aseman, tasoittimeen tulee kiinni magneetti. Arduinon syöttöjännite alennetaan laitteelle sopivampaan viiteen volttiin hakkurimuuntajalla. Rele ja Reed-anturi saavat virtansa Arduinon

omasta viiden voltin pinnistä. Kuvassa 12 on esitetty laitteen sähköistys. Siniset johtimet kuvassa ovat signaalijohtimia.



KUVA 12. Laitteen sähköistys kaavio.

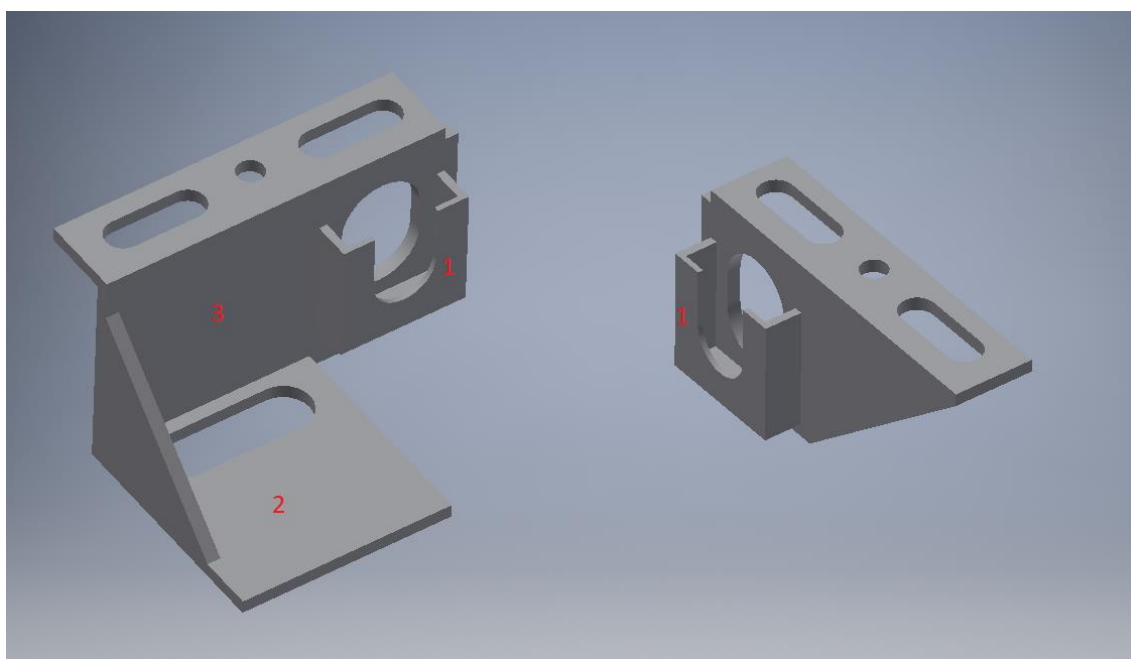
Johdotuksen puolesta releelle ja Reed-anturille riittää pienen virran tarpeen vuoksi hyppylankajohtimet. Virtalähteeltä moottorille vedettäväksi johdoiksi valitaan huomattavasti paksumpaa millimetrin halkaisijan omaavaa kuparijohdetta. Laskettaessa arvioidulla mahdollisella maksimivirrantarpeella 10 ampeerilla ja 30 cm mittaisilla johtimilla, joidenka materiaali on kupari, kaava 7 antaa jännitehäviöksi 0,06 V. Esimerkiksi 12 V jännitteellä tämä on vain puolen prosentin jännitehäviö, eikä näin ollen liian suuri. Jotta laite olisi helposti purettavissa, moottorille ja virtalähteelle tulee 2 napaiset liittimet.

Suunnitelmassa virtalähteenä käytetään alustavasti säädettävää teholähdettä, jolla mitoitetaan testausvaiheessa virtalähde vastaamaan laitteen jännitteen ja virran tarvetta.

4.6 Laipat

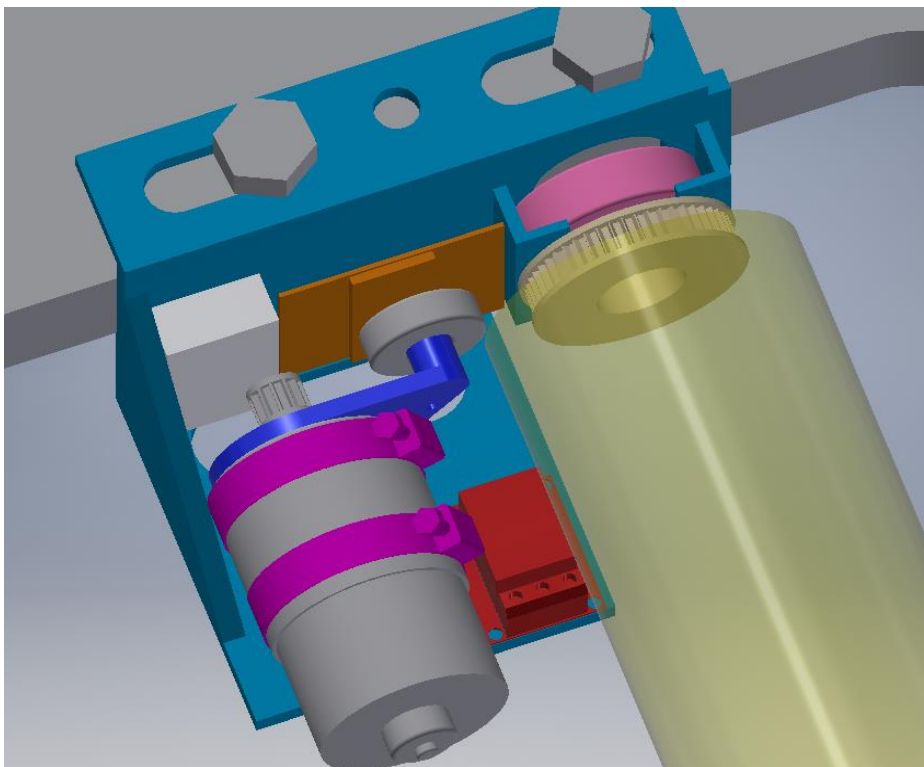
Päätylaippojen suunnittelussa olennaista on, että ne mahtuvat olemassa olevaan tilaan ja niihin saadaan kaikki komponentit tukevasti kiinni. Lisäksi laitteen purkamisen ja kasaamisen pitää olla mahdollista.

Akseli kiinnittyy laippoihin akselin päädyssä olevista laakereista, jotka työnnetään laippoihin suunniteltuihin laakeripesiin (kuva 13 kohta 1). Moottorin ja ohjaus-elektroniikan puoleiseen laippaan tulee vaakatasossa oleva "lattia" johon kiinnittyy moottorin jalusta sekä rele (kuva 13 kohta 2). Lattian ja seinämän välille tulee "poikkiparru" tukevoittamaan laippaa. Laipan lattiaan tulee seinämän puoleiseen reunaan aukko hiekanpoistolle ja johdotukselle. Arduino ja hakkurimuuntaja kiinnittyy laipan seinämään laakeripesän viereen (kuva 13 kohta 3). Laipan lattiassa oleva aukko mahdollistaa myös Arduinon ohjelmoinnin, sen ollessa laipassa kiinni.



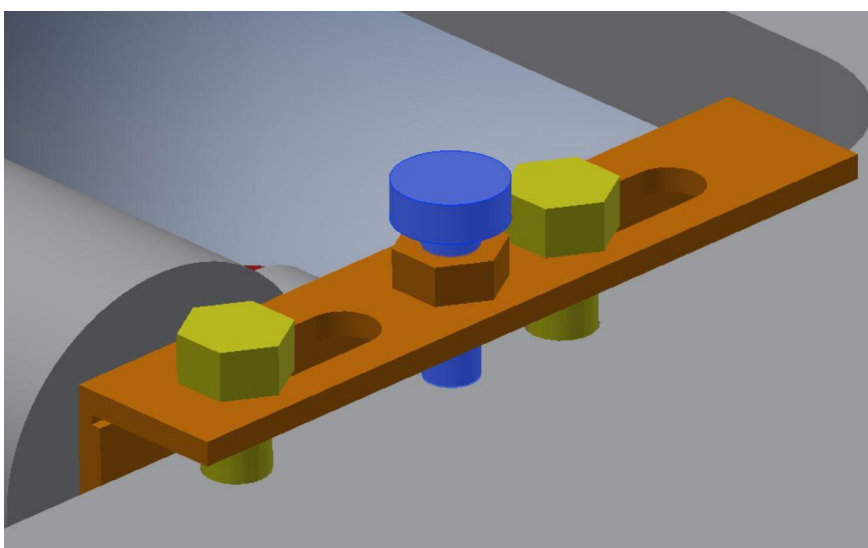
KUVA 13. Päätylaipat.

Kuvassa 14 on vielä esitetty kokoonpano ohjauselektroniikan puoleisesta laipasta, millä on varmistettu, että kaikki komponentit mahtuvat paikoilleen ja laite on kasattavissa. Kuvassa Valkoinen laatikko kuvastaa hakkurimuuntajan viemää tilaa, oranssi komponentti on Arduino, sekä punainen komponentti, joka jää osittain moottorin putkiklemmareiden alle on relemoduuli.



KUVA 14. Kokoonpano ohjauselektroniikan ja moottorin puoleisesta laipasta.

Laipat kiinnittyvät tulostimeen tulostimessa valmiiksi oleviin pultin paikkoihin M12 -ruuveilla. Laipan kiinnitysruuvien reiät mahdollistavat pitkittäisen laipan aseman säätämisen. M12 -ruuvien välissä oleva ruuvi kiristää laipan paikoilleen haluttuun korkeuteen (KUVA 15).



KUVA 14. Päätylaippojen säätö/kiristys systeemi.

5 PROTOTYYPIN VALMISTUS JA TESTAAMINEN

5.1 Testipenkin valmistus

Koska harjasysteemillä ei ole omaa kantavaa runkoa, eikä tulostinta ole syytä laittaa seisontaan prototyypin alustavaa testaamista ja kokoonpanoa varten, tarvittiin jokin alusta, jolle harja kasataan ja testataan alustavasti. Harjan testaamista varten rakennettiin siis oma testipenkki.

Testipenkki rakennettiin laudoista, niin että se vastaa kiinnityspisteiltään ja mitoiltaan tulostimen täyttökulua. Testipenkki koostuu 4 laudasta, jotka ovat ruuvattu toisiinsa. Tulostimen kiinnityskohtia vastaavat kiinnityskohdat tehtiin penkkiin poraamalla lautoihin reiät ja liimaamalla epoksi liimalla reikien päälle M12 pultit, joista laipat kiinnittyvät penkkiin. Kuvassa 16 on valmis testipenkki, jossa on toinen laippa kiinni.

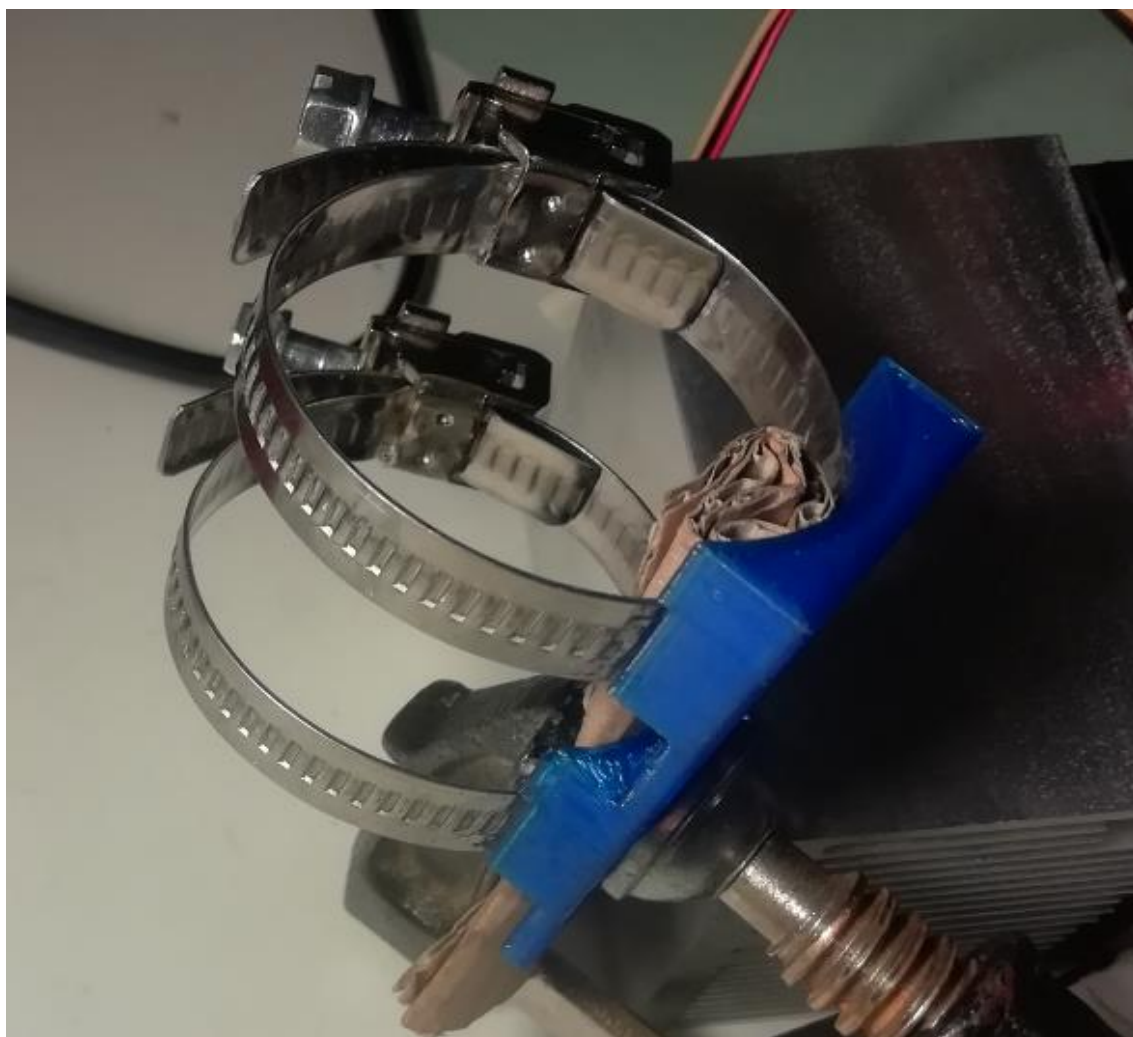


KUVA 16. testipenkki.

5.2 3D-tulostettavien osien valmistus

Prototyyppiä varten kaikki harjalaitteen osat, joita ei löydetty suoraan kaupan hyllyltä tai katalogeista, valmistettiin 3D-tulostamalla muovista. Tulostettavia osia ovat siis päätylaipat, moottorin jalusta sekä hihnankiristimen runko.

Tulostettuun muoviseen moottorin jalusta putkiklemmarit kiinnitettiin epoksi liimalla. Huomattavasti tukevampi moottorin kiinnittyminen saavutettaisiin työstämällä jalusta metallista ja kovajuottamalla putkiklemmarit siihen. Kuvassa 17 putkiklemmarit ovat liimautumassa kiinni moottorin jalusta.



KUVA 17. Moottorin jalustan liimaaminen.

Hihnankiristimen laakeri kiinnitettiin kuumaliimalla. Kuvassa 18 on valmis hihnankiristin.



KUVA 18. Hihnankiristin ja sen laakeri.

Päätylaippoihin porattiin reiät kaikille komponenteille ja viilattiin laakeripesiä niin, että laakerit menevät paikalleen. Kuvassa 19 on päätylaippa, joissa on laakeri paikoillaan.



KUVA 19. Päätylaippa ja laakeri kiinni testipenkissä.

5.3 Akselin kokoaminen

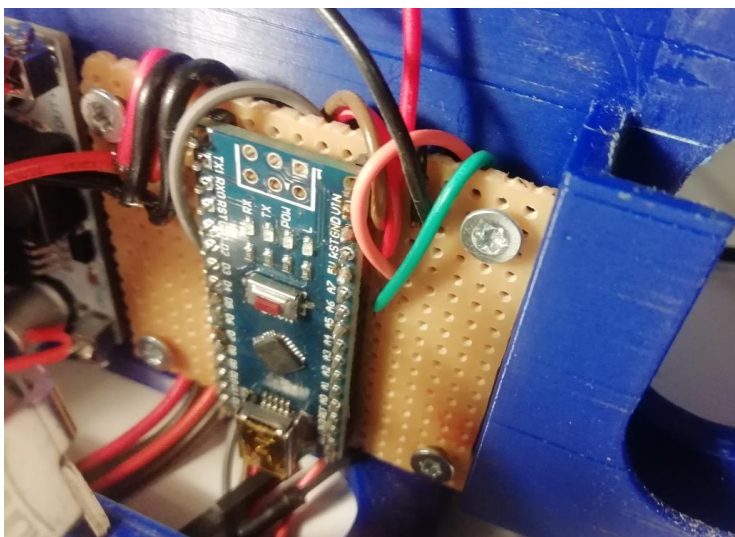
Kahden metrin mittainen, halkaisijaltaan 20 mm pyöröteräs tanko sahattiin 115 cm mittaiseksi ja sen päätyjä viilattiin niin, että laakerit saatiin sopimaan paikoilleen. Harjat pysyvät akselilla siten, että päädyissä oleviin harjoihin porataan reikä, johon tehtiin kierteet ja kiristettiin ruuveilla akselille. Akselille tuleva hihnavetopyörän akselireikä koneistettiin akselille sopivaksi. Suunnittelusta poiketen, että päästään prototyypin kanssa vähemmällä koneistuksella, hihnavetopyörä kiinnittyy akselille kiilan sijasta kuumaliimalla. Kuvassa 20 on hihnavetopyörän puoleinen akselin pääty, jossa on kiinni laakeri, hihnavetopyörä ja harja, jonka kiinnitysruuvi on näkyvillä.



KUVA 20. Akselin pääty, jossa hihnavetopyörä laakeri ja harja kiinni.

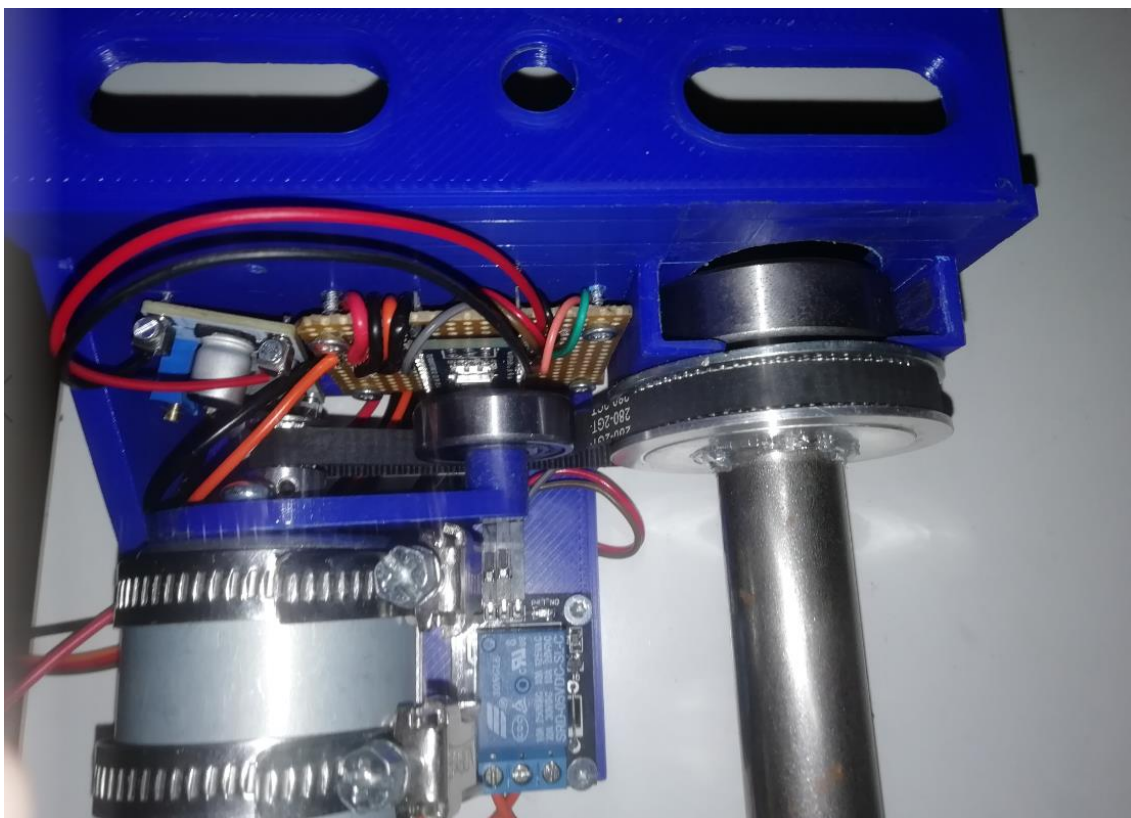
5.4 Kytkenät ja kokoonpano

Kytcentöjä varten Arduino kolvattiin reikälevylle siten, että Arduinon jalkoja ei katkaistu, vaan piirilevyn ja kiinnitysalustan väliin jäi tilaa vetää johdot siististi piirilevyn takaa (KUVA 21).



KUVA 21. Arduino reikälevyllä kiinni laipassa ja johdotus levyn takaa.

Reikälevyyn ja laippaan porattiin toisiaan vastaavat reiät, joista Arduino kiinnittyy pienillä 12mm mittaisilla ruuveilla laippaan. Samoilla 3x12 ruuveilla laippaan kiinnittyi myös rele, moottorin jalusta sekä hakkurimuuntaja. Kuvassa 22, on laipassa kiinnitettynä kaikki komponentit ja elektroniikka, suunnitelman mukaisesti (KUVA 13). Hakkurimuuntaja ei ole kiinnitettynä kuvassa laippaan.



KUVA 22. Komponentit kiinni laipassa ja hihna paikoillaan

5.5 Ohjelmointi

Ohjelma tulee toimimaan niin, että Reed-anturi tunnistaa harjaa lähestyvän hiekkantasoittimen ja Arduino-ohjatulla releellä kytketään harja pyörimään. Harja pyörii määrätyn ajan ja pysähtyy.

Arduino-mikrokontrolleria ohjelmoidaan Arduinon omalla C-kielen kaltaisella kielellä. Yleensä Arduino ohjelma koostuu aliohjelmasta Setup, joka ajetaan laitteen käynnistyessä, sekä aliohjelmasta Loop, joka aloittaa toistumisen, kun alustus on suoritettu. Kuvassa 23 on tyhjä Arduino ohjelma, jonka päälle aloitetaan rakentamaan omaa ohjelmaa.

```
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

KUVA 23 Arduino ohjelman pohja.

Ennen aliohjelmaa Setup, määritellään kaikkien aliohjelmien ulkopuolella alkuarvoja ohjelman selkeyttämiseksi.

```
const byte rele = 8; //releen pinni
char data; // serial datalle tyhjä chari
int dur = 500; // harjan pyörimisen kesto (ms)
byte val; // reed anturilta luettu ardo
byte last_val = 1; //reed anturilta luettu viime arvo (jotta saadaan laskettua tasoittimen anturin ohitus kerrat)
byte pass_count = 0; // laskuri anturin ohitus kerroille
```

KUVA 24. Ohjelman alkuarvot ennen Setuppia.

Setup aliohjelmassa laitteelle kerrotaan releen digitaalinen output pinni sekä Reed-anturin analoginen input pinni. Käynnistetään myös sarjamonitori, että voidaan käskyttää ohjelmaa ja debugata sen kautta.

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(rele, OUTPUT);
  pinMode(A0, INPUT);
}
```

KUVA 25. Setup aliohjelma.

Loop aliohjelmaan tehdään valintarakenne, joka hoitaa sarjamonitorin kautta vastaanotetut komennot. Loop katsoo joka kierroksella, onko sarjamonitorilla dataa ja lukee Reed-anturin arvon. Harjan pyöriminen alkaa, jos Reed-anturilta luetaan, että lana on anturin kohdalla ja haluttu anturi ohitus määrä on täyttynyt.

Sarjamonitorin kautta pystyy antamaan ohjelmalle kolme eri käskyä, joista ensimmäinen on Arduino laitteen tunnistusta varten, toinen on harjan testipyöritys ja kolmas harjan pyörimisajan muuttaminen. Kuvassa 26 on Loop aliohjelman.

```
void loop()
{
  if(Serial.available()) //jos sarjamonitorilla jotain, se tallennetaan data muuttujaan
  {
    data = Serial.read();
  }
  switch(data) // jos data on t,o tai p
  {
    case 't':
      Serial.print('y'); //arduino vastaa sarjamonitoriin y
      data = ' ';
      break;

    case 'o': //harjan testipyöritys
      digitalWrite(rele,HIGH);
      delay(dur);
      digitalWrite(rele,LOW);
      data = ' ';
      break;

    case 'p': //alottaa pyörimisen keston muuttamis aliohjelman
      data = ' ';
      dur = intinput();
      break;
  }
  val = analogRead(A0); //luetaan reed-anturi
  if(val == 0 && last_val != 0) //laskurin mahdollistamiseksi etsitään reed-anturin tilan muutosta
  {
    if (pass_count == 2) // jos haluttu ohitusten määrä täyttyy pyöritetään harjaa
    {
      digitalWrite(rele,HIGH);
      delay(dur);
      digitalWrite(rele,LOW);
      pass_count = 0;
    }
    pass_count++;
  }
  delay(100);
  last_val = val; // nykyinen ree-tila edelliseksi
}
```

KUVA 26. Loop aliohjelma.

Pyörimiskeston muuttava aliohjelma kasaa sarjamonitorille kirjoitetun luvun merkki kerrallaan, muuttaa sen kokonaisluvuksi ja palauttaa harjan pyörimiskesto muuttujaan. Kuvassa 27 on aliohjelma, jolla pyörimisaikaa muutetaan.

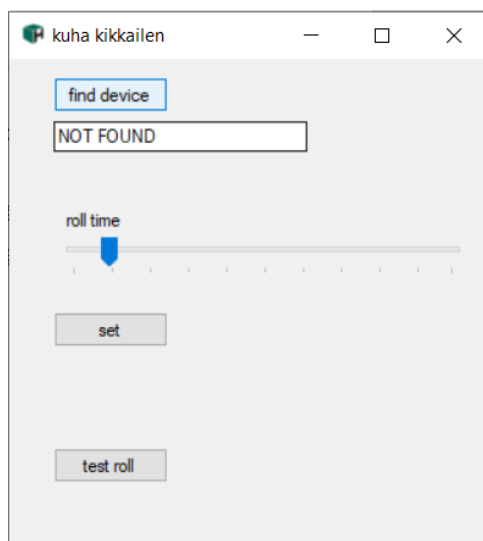
```

int intinput()
{
    bool looper = true;
    String buf = "";
    int cnt = 0;
    while(buf.length()<2) //niin kauan odottaa kunnes jotain on annettu sarjamonitorille
    {
        while (Serial.available())
        {
            delay(3);
            if(Serial.available())
            {
                char c = Serial.read(); //luetaan seuraava merkki monitorilta ja lisätään buf Stringiin
                buf += c;
            }
        }
        looper = false;
    }
    return buf.toInt(); //String kokonaisluvuks ja palautus dur muuttujaan
}

```

KUVA 27. Kokonaisluku inputin lukeminen sarjamonitorilta.

Arduinon ohjelmoinnin lisäksi tehdään vielä C#-kielellä Windows ohjelma, jolla pystytään graafisen käyttöliittymän kautta antamaan Arduinolle sarjamonitorin kautta vastaanotettavat käskyt. Kuvassa 28 näkyy käyttöliittymän ulkoasu.



KUVA 28. Arduinon käskyttämiseen koodattu käyttöliittymä.

5.6 Testaaminen

Testaaminen suoritettiin prototyypille omatekoisessa testipenkissä. Kuvassa 29 laite on testausvalmiiksi kasattuna testipenkissä.



KUVA 29. Harjalaite testipenkissä.

Laitteen testaaminen aloitettiin hakemalla säädettävällä teholähteellä harjasysteemille sopiva jännitteen ja virran arvo. Jännite vaikuttaa harjan pyörimisnopeuteen ja virta harjan vääntöön. Arvojen hakemisen tuloksena sopiva virtalähde laitteelle on 9-12V ja 5A. Näillä arvoilla harja ei pyöri liian kovaa sekä vääntöä on riittävästi pyörittää harjaa suuremmankin kuorman alla.

Ohjelman puolesta laite toimii halutulla tavalla. Myös ohjelman testipyöritysominaisuus sekä harjan pyörimisajan säätö toimivat. Harjan pyörimisennakkoa pystyttiin säätämään asettamalla Reed-anturi tunnistamaan hiekantasoitin kauempaa tai lähempää harjaa. Reed-anturin asettelu laitteeseen ei vaadi äärimmäistä tarkkuutta, sillä käytettävästä magneetista riippuen tunnistusetäisyys on hyvä, jopa 1,5 cm suhteellisen heikolla magneetilla.

Akseli pyöri laippojen välissä esteettä eikä hangannut mihinkään. Harjojen akselille kiinnittyminen vaatii oletettua kovempaa kiristämistä, mutta ei niin kovaa, ett-eikö harjan PVC runkoon tehdyt kierteet olisi sitä kestänyt. Akselin pyöriessä oli havaittavissa pientä värinää, sillä akselina käytettävä pyöröteräs ei ollut täysin suora.

Hihnan puolesta, toimittajalta ei löytynyt 7,5 cm akselivälillä tarvittavaa hihnaa, joten hihna on 8 cm akselivälillä, mikä miltei aiheuttaa kiristimen kohdalta hihnosten yhteen osumisen. Tämän hetken hihnalla ei siis ole paljoa venymisvaraa. GT2-hammashihna pyöritti harjaa moitteettomasti. Hihnankiristin toimii, eikä hihna löysty, vaikka tässä vaiheessa kiristimeen ei vielä ollut asennettu joustia.

6 POHDINTA

6.1 Riskit

Akselin ja harjan osalta suurimmat riskit muodostuvat akselin kieroutumisesta ja harjojen kiinnittymisestä akseliin. Jos akseli kieroutuu ja pyörii epätasapainoisesti, se voi kuluttaa hiekantasoittajaa epätasaisesti tai mahdollisesti rikkoa tärinällään jotain itse harjalaitteesta. Harjojen huono kiinnittyminen akselille taas aiheuttaa sen, että harjat eivät pyöri akselin mukana, eivätkä näin ollen puhdista hiekan tasoitinta kovin tehokkaasti.

Moottorin ja voimansiirron osalta suurimpina riskeinä ovat hiekan pääsy moottoriin ja tämän hetken hinnalla, hihnan löystyminen tai liika venyminen. Johtuen moottorin kiinnitystavasta, hihnankiristin saattaisi oikeanlaisessa tärinässä tai moottorin nykimisessä löystyä niin, että se ei enää pyöritä harjaa. Hihnan venyminen puolestaan saattaa aiheuttaa tämänhetkiselällä vähän pitkällä hinnalla sen, että hihna osuu itseensä kiristimen kohdalta.

Rakenteellisen kestävyyspuolesta, laitteen heikoin lenkki, on moottorin jalustan putkiklemmareiden liimaukset, jotka eivät selvinneet vahingossa tehdystä pudotustestistä. Myös epäilyttää, että alkaako prototyypissä moottorin ja ohjaus-elektroniikan puoleinen laippa taipumaan ajan myötä moottorin painon aiheuttamasta väännöstä.

Elektroniikan puolesta on mahdollista, että joko muuten vaan tai johtuen moottorin tai akselin tärinästä, jokin komponentti antaa periksi. Jos Arduino ei saa virtaa rele ei kytkeydy ikinä päälle eikä harja pyöri. Vikaherkin ohjauksen komponentti on todennäköisesti rele, sillä siinä on liikkuvia osia.

Yleisesti laitteen on tarkoitus toimia olosuhteissa, joissa on hienojakoista hiekkaa kaikkialla, voi hiekka mahdollisesti löytää jonkin paikan, johon sen ei ole suunniteltu menevän.

6.2 Yhteenveto ja kehitysideat

Harjalaitteen suunnitteluvaihe onnistui hyvin. Suunnittelu olisi kannattanut alun pitäen aloittaa oikeanlaisen harjan löytämisellä, sillä harjan akselireikä määrittää millaista akselia on mahdollista käyttää, joka puolestaan vaikuttaa laakereiden kokoon, mikä puolestaan vaikuttaa laippojen suunnitteluun ja tätä kautta komponenttien asetteluun. Eli siitä lähtien, kun harjojen tarkat mitat tiedettiin, pystyttiin suunnittelu viemään läpi edellä mainittua loogista polkua niin, että ei tarvinnut palata taaksepäin suunnittelemaan mitään osaa tai minkään komponentin asemaa uudelleen.

Tilattavien komponenttien puolesta syksyn 2019 postilakko osui huonoon kohtaan ja viivästytti ohjauksen, moottorin ja voimansiirron osien saapumista. Postilakon aikana tehtiin laitteen ohjaus ja ohjelmointi käyttäen samankaltaisia vaihtoehtoisia komponentteja ohjelman testaamiseen.

Laitetta kasatessa huomioitavaa on, että olisi ehdottomasti kannattanut tulostaa laippoihin niihin tulevien reikien kohdalle reiät, jotta poistetaan mahdollisuus porata reikiä väärin kohtiin.

Lopputulemaan ollaan ainakin prototyypin testaamisen perusteella tyytyväisiä, sillä laite toimii halutulla tavalla. Kehittämistä laitteessa vielä silti riittää.

Laitteen ohjauksen osalta olisi parempi, jos käytettäisiin kahta Reed-anturia yhden sijaan, että voidaan tunnistaa, kumpaan suuntaan hiekantasoitin liikkuu anturin ohi. Kun tasoittimen liikesuunta tiedetään, välttyttäisiin tyhjiltä harjan pyöryksiltä, mikä puolestaan pidentäisi harjalaitteen elinikää. Reed anturit voitaisiin myös korvata Hall-antureilla ja näin ollen hiekan tasoittimeen ei tarvitsisi kiinnittää magneetteja.

Mekaanisten ominaisuuksien puolesta, moottorin jalustan tulisi ehdottomasti olla metallia johon putkiklemmarit olisivat kovajuotettu. Itseasiassa jos laitteesta halutaan toimintavarmempi ja pitkäikäisempi korvattaisiin kaikki muutkin muovista tulostetut komponentit metallisilla. Myös akselina toimiva pyöröteräs tanko

olisi syytä korvata oikealla akselilla, joka on suora ja jotain käsiteltyä ja laadukkaampaa terästä.

LÄHTEET

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., Tekniikan kaavasto. 2015 14. painos. Tammertekniikka. Bookwell Oy. Porvoo.

Luosma, P. Urakuulalaakerien laskenta. Luettu 17.4.2020. <https://monivies-tin.jamk.fi/ohjelmat/teknologia/konetekniikan-materiaalit/koneenosat/urakuula-laakerien-laskenta>

SKF. Size selection based on static load. Luettu 18.4.2020. <https://www.skf.com/ph/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-size/size-selection-based-on-static-load>

SKF. Guideline values for static safety factor. Luettu 18.4.2020. <https://www.skf.com/pages/jsp/catalogue-table.jsp?id=tcm:144-114912>

Koivisto, J-P., Mikkolainen, P. & Rantala, J. Autotekniikka 5.2 Autosähkötekniikan perusteet. 2012 1. painos. Helsinki: Otava.

3D HUBS. Introduction to Binder Jetting 3D printing. Luettu 15.3.2020. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>

Voxeljet. VX1000 3D printing system. Luettu 19.2.2020. <https://www.voxel-jet.com/3d-printing-systems/vx1000/>

SKF. Greases for capped bearing. Luettu 20.4.2020. <https://www.skf.com/ph/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings#cid-467020>

SKF. W 6004-2RS1 Deep groove ball bearing. Luettu 20.4.2020. <https://www.skf.com/ph/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%206004-2RS1>

RRE. How does a Reed Switch work? Luettu 10.3.2020. <https://www.reed-sensor.com/general-reed-switch-faq/>

LIITTEET

Liite 1. ZZ-Brush harjat.

ZZB3310-K681

Technical drawing of the ZZB3310-K681 brush. The drawing includes a side view showing the brush's profile with dimensions: total length 100 ± 0.3 , body diameter $\varnothing 33$, and a detail of the bristle pattern with $LA\ 7.1$. A note specifies $I\varnothing = 15/20^{+0.2}_{-0}$.

Product data: Mink Zick-Zack System

Body material:	Polyamide 6 + 15% glass fibre (PA-GFK)
Body colour:	black
Bristle material:	Polypropylene (PP)
Bristle colour:	transparent / smooth
Spindle hole diameter:	20
Density:	dense
Diameter:	70
Body diameter:	33
Bristle diameter:	0,20
Body length:	100

Quantity	Article	Unit price	Total
✓ 11	x ZZB3310-K681	22,62 €	248,82 €

Liite 2. 775 DC motor dimensions

